

Probabilistische lekberekening

Verslag van het afstudeerproject 'Kwantitatieve methodes in het scheepsontwerp'

De ondoorzichtigheid en de complexiteit van de probabilistische lekberekening maken het voor ontwerpers moeilijk om van tevoren in te schatten wat de veiligheidsindex, het resultaat van deze berekening, voor een specifiek schip zal zijn. In feite is de lekberekening dus een black box waaruit niet meer informatie te verkrijgen is dan 'het schip voldoet aan de IMO-eisen' of 'het schip voldoet er niet aan'. Het doel van het afstudeeronderzoek was dan ook het vergroten van het inzicht van de ontwerper in de invloed van de scheepshoofdafmetingen en de positie van langs- en dwarsschotten en van dekken op de lekstabiliteit, en bovenal hulp bieden bij het vinden van die indeling - bij een gegeven aantal schotten en dekken - waarbij de index A (attained subdivision index) maximaal is.

De middelen die ter beschikking stonden waren de computerprogramma's PIAS en COMPACT; het eerste is voorzien van een lekberekeningsmodule, het tweede is een optimalisatieprogramma dat als hulpmiddel voor ontwerpprocessen is ontwikkeld. Het afstudeerproject beoogde een koppeling te leveren tussen beide programma's zodat het zoekproces automatisch wordt doorlopen. De eerste resultaten beantwoorden aan de verwachtingen en worden hier besproken.

Probabilistische lekberekening

Sinds de Duitser Kurt Wendel in 1960 voorstelde om de lekberekening met behulp van kansrekening uit te voeren, is er veel aan zijn oorspronkelijke ideeën gesleuteld. Pas in 1974 werd tijdens de toen georganiseerde SOLAS-conferentie officieel aandacht geschonken aan deze nieuwe methode. Voordat de probabilistische lekberekening haar intrede deed, diende de veiligheid van een aangevaren schip te worden beoordeeld aan de hand van een indompelingslijn: de diepgang die niet mocht worden overschreden wanneer er water in een scheepscompartiment was gestroomd. De zogenaamde kromme van vulbare lengtes liet zien wat de maximale afmetingen van de compartimenten waren: bij een bekende permeabiliteit van het beschadigde compartiment en de berekende maximaal toegestane massatoename was een grens te bepalen voor de ruim- en tankinhouden. Er rezen echter bezwaren tegen een veiligheidsbeoordeling op deze manier, onder andere om de volgende redenen:

- Het toepassen van een indelingsfactor als veiligheidsmarge op de compartimentafmetingen beperkt de ontwerprijheid.
- De beschreven methode impliceert dat hoe verfijnder de scheepsindeling, des te veiliger het schip is. Dit is niet noodzakelijkerwijs waar: als alle compartimenten klein zijn, is de kans immers groter dat meerdere compartimenten tegelijkertijd lek raken.
- Er wordt geen rekening gehouden met de plaats en de grootte van het lek.
- De stabiliteit van het schip wordt buiten beschouwing gelaten.

Om het laatstgenoemde probleem op te los-

sen bestaat de deterministische lekberekening niet alleen uit een trim- en zinkingsanalyse, maar ook uit een reststabiliteitsberekening.

Wendel probeerde met zijn nieuwe ideeën bovendien de andere bezwaren op te heffen. Bondig geformuleerd houdt de probabilistische benadering van de lekberekening een onderzoek naar alle mogelijke schadegevallen in. De individuele gevallen worden gekarakteriseerd door hun positie en grootte. Voor alle lekgevallen dient nu de overlevingskans van het schip te worden berekend. De som van deze kansen geeft de attained subdivision index A en de waarde ervan is gebonden aan een voorgeschreven minimum, de required subdivision index R.

De overlevingskans A_i voor een specifiek schadegeval i is per definitie gelijk aan het product van de kans dat dat geval zal voorkomen p_i en de kans dat het schip dan zal overleven s_i (wat afhankelijk is van de scheepsstabiliteit). Het veiligheidsgetal voor het gehele schip is dus gelijk aan:

$$A = \sum A_i = \sum (p_i \cdot s_i).$$

Tekortkomingen van de probabilistische lekberekening

De probabilistische lekberekening neemt enkele bezwaren tegen de oude deterministische versie weg, maar zij is gecompliceerder dan de gegeven beschrijving doet vermoeden. Onderstaande opsomming bevat een selectie uit de verschijnselen die hiervoor zorgen:

- Niet-waterdichte openingen die onder water komen te staan veroorzaken het volstromen van compartimenten die misschien niet lek

zijn geraakt; pijpleidingen verbinden compartimenten met elkaar en maken het mogelijk dat water uit een lek compartiment doorstroomt naar een onbeschadigd compartiment. De invloed van deze gebeurtenissen kan erg groot zijn, maar de details die voor de problemen zorgen, zijn nog niet bekend in de eerste fases van het scheepsontwerp, evenmin als de definitieve scheepsvorm en -indeling, het scheepsgewicht en de exacte diepgang.

- In sommige gevallen kan geringe schade ernstiger gevolgen voor het schip hebben dan een groot lek. Het is niet te voorspellen wanneer dit optreedt, maar de regels schrijven voor dat de schadelijkste gevallen bepalend zijn voor de veiligheid. Dit houdt in dat, los van het grote aantal schadegevallen dat überhaupt bij de berekening is betrokken, er bovendien een extra hoeveelheid minor damages onderzocht moet worden.

De probabilistische lekberekening vertoont ook enkele tekortkomingen, die hier in willekeurige volgorde worden behandeld:

- Er zijn voorbeelden bekend waarin de verschuiving van een compartiment over 1% van de scheepslengte een lekkansverandering oplevert van 90% of waarin de lekkans voor bepaalde compartimenten niet de waarde oplevert die logischerwijs verwacht mag worden. Dit wijst op een discontinuïteit in de lekkansrekening.
- De schadestatistieken waarop de rekenregels zijn gebaseerd, zijn afkomstig van bijna 300 schepen. Gezien de grote verschillen in de betrokken scheepstypes, en in de plaats en tijd van aanvaring die zijn geregistreerd, is het moeilijk gebleken om de invloed van

vernieuwingen in de exploitatie of het ontwerp van schepen, bijvoorbeeld versterkte huidconstructies, in rekening te brengen. Hierdoor gelden de gegevens inmiddels als verouderd.

- Een merkwaardige eigenschap van de formules voor de lekkans van combinaties van compartimenten is dat zij een negatieve waarde kunnen opleveren. Ondanks de onmogelijkheid om dit te interpreteren (een negatieve kans bestaat eenvoudigweg niet), wordt hier niets aan gedaan, deels omdat het elimineren van negatieve kansen nieuwe negatieve kansen kan veroorzaken. De kans van alle lekgevallen samen (S_p) is daarom niet altijd gelijk aan 1, maar kan tot ongeveer 10% hiervan verschillen. In de ideale situatie zou een totale kans kleiner dan 1 betekenen dat nog niet alle lekgevallen zijn onderzocht, en een kans groter dan 1 dat sommige gevallen dubbel zijn gerekend. De beschreven onvolkomenheid maakt dit controlemiddel echter onbruikbaar.
- Omdat de lekberekening uit zoveel stappen bestaat, is het niet mogelijk op basis van een klein aantal gegevens de uiteindelijke waarde van de veiligheidsindex A te schatten. Hierdoor is de invloed die ontwerp-aanpassingen op dit getal zullen hebben, nauwelijks van tevoren in te schatten, wat de ontwerper noodzaakt om de lekberekening met behulp van trial and error uit te voeren tot een bevredigend resultaat is bereikt.

Het omzeilen van de problemen

Het afstudeeronderzoek richtte zich op het blootleggen van de relatie tussen de scheepsindeling en de daaruit volgende veiligheidsindex. De indeling wordt bepaald door de hoofdafmetingen van het schip en de positie van (waterdichte) schotten en dekken. De eerder genoemde problemen die gepaard gaan met het gebruik van de probabilistische lekberekening zorgen ervoor dat de ontwerper het effect van veranderingen in de scheepsindeling niet snel kan achterhalen. Evenzo verhinderen ze dat de oorzaak van een onvoldoende veiligheid van een ontwerp kan worden achterhaald.

Als er geen inzicht in het rekenproces kan worden verkregen door de berekening zelf nader te onderzoeken, dan moet er een 'omweg' worden genomen die de relaties tussen ontwerp en veiligheidsindex benadert. Hoewel het risico bestaat dat die omweg de nauwkeurigheid niet ten goede komt, heeft hij als grote voordeel dat het gezochte verband duidelijk tot uitdrukking wordt gebracht.

Het verkregen inzicht dient uiteindelijk een belangrijker doel, namelijk het optimaliseren van de scheepsindeling, dat wil zeggen het vinden van die indeling - bij een gegeven aantal schotten en dekken - waarbij de veiligheidsindex A

maximaal is. In feite wordt hierdoor de laatste optimalisatiestap aan de ontwerper overgelaten. Het is namelijk niet nodig om de grootst mogelijke veiligheid te behalen, er is immers al een minimumwaarde voor de index voorgeschreven. Weet de ontwerper echter welk maximum hij kan verkrijgen, dan kan hij beslissen op welke manier hij van de 'reserve' gebruik wil maken: bijvoorbeeld alsnog een suboptimale scheepsindeling kiezen die op andere gebieden dan de veiligheid goed presteert, of extra lading in rekening brengen die de stabiliteit negatief beïnvloedt.

Een optimalisatieprogramma

Er zijn al eerder pogingen ondernomen om de scheepsindeling te optimaliseren, maar die hebben geen bevredigende resultaten opgeleverd. Mij is daarom een bestaande, maar op dit gebied niet eerder toegepaste methode ter beschikking gesteld, die CQM in een speciaal voor deze categorie van problemen ontwikkeld programma heeft verwerkt. Kenmerkend voor de opgaven waarvoor de applicatie, COMPACT genaamd, wordt gesteld, is dat de berekeningen die de output- of responsvariabelen opleveren (zeer) tijdrovend zijn. Dit is des te bezwaarlijker wanneer er een combinatie van waarden voor de input- of ontwerpvariabelen moet worden gevonden die leidt tot het beste ontwerp. Het domweg uitproberen van bepaalde combinaties zal onnodige tijdverspilling tot gevolg hebben en, belangrijker nog, zelden convergeren naar het optimum.

Als voormalig onderdeel van Philips heeft CQM zich bijvoorbeeld beziggehouden met het vinden van de beste afmetingen van tv-beeldschermen met als doel de minimalisatie van optredende vacuüm- en temperatuurspanningen tijdens de warmtebehandeling van de onderdelen. Bij dit specifieke probleem waren honderden variabelen betrokken.

De systematische aanpak van COMPACT heeft volgens CQM het voordeel dat de werptijd verkort wordt, terwijl de kwaliteit van het ontwerp toeneemt dankzij de geavanceerde optimalisatiemethodes. Daarbij komt nog dat het een stand-alone programma is dat niet gebonden is aan enig specifiek probleem maar juist breed inzetbaar is.

De procedure die COMPACT volgt om tot een optimum te komen, bestaat uit vier fases:

- 1) de probleembeschrijving;
- 2) het opstellen en uitvoeren van simulaties;
- 3) het construeren van een model; en
- 4) de analyse van resultaten en de optimalisatie.

De probleemspecificatie bestaat uit het kiezen van de ontwerp- en responsvariabelen, evenals het voorschrijven van de grenzen

waaraan ze gebonden zijn (ofwel: de definitie van het ontwerpdomain). Deze fase wordt afgesloten met het opstellen van een doelfunctie, die beschrijft waartoe het rekenproces moet leiden. In het voorbeeld van de tv-beeldbuizen zou hij kunnen luiden: de minimalisering van de optredende spanningen in alle meetpunten.

Vervolgens dient COMPACT een zogenaamd experimenten- of simulatieschema samen te stellen. De 'steekproeven' waaruit zo'n schema bestaat, zullen de basis vormen van het analytische model. Het programma kiest een vooraf opgegeven aantal simulaties op zo'n manier, dat ze zo goed mogelijk verspreid zijn over de 'ontwerpruimte' en dat ze zoveel mogelijk informatie leveren ten behoeve van het model.

Na de fase van design of experiments kunnen de simulaties daadwerkelijk worden uitgevoerd. In de regel neemt een andere computertoepassing deze taak op zich. Die berekent dus voor elk experiment de respons van de corresponderende set van ontwerpvariabelen. De resultaten dienen weer teruggesluisd te worden naar COMPACT.

De derde stap bestaat uit de constructie van compacte modellen (ook bekend als response surface models) die de relatie tussen de ontwerp- en responsvariabelen beschrijven. Als deze ten slotte zijn gemaakt, kan de gebruiker de geldigheid ervan testen met behulp van bekende validatietechnieken.

In de laatste fase worden de verkregen modellen gebruikt voor het analyseren van de gegevens (gevoeligheidsanalyses), voor het doen van voorspellingen omtrent de variabelen, en het uitvoeren van optimalisaties.

De uitvoering van een probabilistische lekberekening

Een van de programma's die zijn ontwikkeld om op verschillende gebieden berekeningen voor schepen uit te voeren, is PIAS (Programma voor de Integrale Aanpak van het Scheepsontwerp). Deze applicatie van SARC is een verzameling van modules die kunnen worden gebruikt voor o.a. het ontwerpen en stroken van scheepsvormen en het uitvoeren van hydrostatische en hydrodynamische berekeningen en van stabiliteitsanalyses. Ook een probabilistische lekberekening behoort tot de mogelijkheden; het aantal hiervoor benodigde modules is, als de scheepsvorm eenmaal is vastgelegd, slechts twee: één voor de definitie van de compartimenten en één voor de lekberekening zelf.

De compartimenten worden beschouwd als de som van een aantal subcompartimenten (minimaal één). De gebruiker legt de vorm daarvan vast door een voor- en een achtervlak (dus de posities van in totaal acht hoek-

punten) op te geven. Alleen de buitengrenzen van de compartimenten worden als schotten gezien, daarbinnen zijn geen scheidingen aan gebracht.

Wanneer het schip volledig is ingedeeld (elk punt in het schip behoort dan tot precies één compartiment) en de gebruiker de te onderzoeken schadegevallen heeft laten genereren, kan een lekberekening worden gestart.

Verder was voor dit project van belang dat een speciale versie van PIAS sinds kort over de mogelijkheid beschikt om zonder tussenkomst van de gebruiker te worden bestuurd. Normaliter vindt de invoer plaats door middel van toetsenbord- en muiscommando's. De macrobesturing van PIAS simuleert die opdrachten en omzeilt zo de hardware.

Combinatie van krachten

De programma's PIAS en COMPACT leveren elk hun bijdrage aan het vinden van een optimale scheepsindeling met betrekking tot de lekveiligheid. Het eerste behandelt de eigenlijke scheepsgegevens, terwijl het laatste - 'blind' voor de werkelijkheid achter de getallen - een optimum zoekt voor een aantal gekozen ontwerpvariabelen. Om de krachten van beide computertoepassingen te combineren is een tussenschakel nodig die de onderlinge gegevensuitwisseling verzorgt.

Bij het ontwerpen van COMPIAS, zoals dit nieuwe programma is gedoopt, ben ik ervan uitgegaan dat het niet alleen een doorgeefluik moest zijn tussen de twee andere programma's, maar dat het ook zo veel mogelijk de communicatie tussen de gebruiker en de computer zou regelen. Met andere woorden, de gebruiker hoeft in de ideale situatie slechts COMPIAS te bedienen om de optimalisatie uit te voeren.

Het optimalisatieproces wordt in de volgende stappen doorlopen:

1. het vaststellen van de hoofdgegevens en de indeling van het schip;
2. de selectie van de ontwerpvariabelen;
3. het samenstellen van een optimalisatiemodel en een daaruit volgend simulatieschema;
4. de uitvoering van de simulaties, dat wil zeggen:
 - a) de transformatie van de scheepsvorm en -indeling, en
 - b) de uitvoering van de probabilistische lekberekening voor elk experiment uit het schema;
5. de verkregen resultaten terugsluizen naar het optimalisatiemodel; en ten slotte
6. de optimalisatie uitvoeren.

Ad. 1, 2: De ontwerper kiest na de afronding van fase 1 welke variabelen hij wil gebruiken. Dit houdt in dat hij de schotten en/of dekken aanwijst waarvoor de meest geschikte positie gevonden moet worden; de respons is uiteraard de veiligheidsindex. Bovendien moet hij aangeven of ook de hoofdafmetingen van het schip mogen variëren ten behoeve van een zo groot mogelijke lekveiligheid. Mijn afstudeerproject richt zich op dit moment op een maximum van ongeveer twaalf variabelen.

Ad. 3; Het samenstellen van het optimalisatiemodel, stap 3, doet de ontwerper in COMPACT. Hier dient hij grenzen aan de variatie van de schot- en dekposities op te leggen, en het aantal experimenten te kiezen dat zal worden uitgevoerd.

Ad. 4, 5, 6: Wanneer ook de hoofdafmetingen ontwerpvariabelen zijn, zal PIAS bij elke simulatie een transformatie van de scheepsvorm moeten uitvoeren. In ieder geval moet de scheepsindeling steeds worden aangepast, niet alleen door de als ontwerpvariabele gemerkte schotten op de juiste positie te zetten, maar ook - als de hoofdafmetingen zijn veranderd - door de overige schotten aan te passen.

COMPACT heeft als input de resultaten uit de probabilistische lekberekening nodig. Daarom is stap 4b het berekenen van de veiligheidsindex A voor de nieuwe scheepsconfiguratie, wat natuurlijk het werk van PIAS is. Deze en de vorige stap worden zo vaak herhaald als er experimenten in het experimentenschema zijn, waarna alle resultaten in het model van COMPACT kunnen worden opgenomen. Ten slotte voert dit programma de eigenlijke opti-

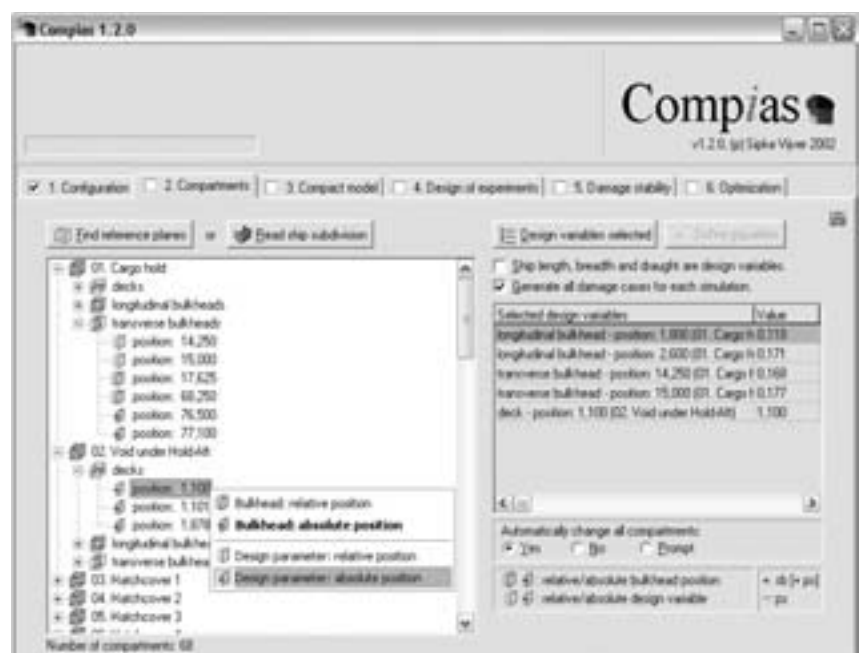
malisatie uit, die nog enige handmatige invoer en nabewerking van de gebruiker verlangt.

De eerste test

De eerste test met het voltooide COMPIAS is uitgevoerd op een klein vrachtschip van een type dat voornamelijk in Noordwest-Europa wordt ingezet. Het aantal ontwerpvariabelen werd beperkt tot twee om de benodigde computertijd niet te groot te laten worden, maar ook omdat het probleem zo in totaal drie dimensies krijgt (beide variabelen plus de resulterende veiligheidsindex A), waardoor resultaten nog grafisch weer te geven zijn. De scheepsafmetingen zijn gegeven en als onveranderlijk beschouwd.

De gekozen schotten betreffen de afscheidingen van bodemtanks en zijkasten in het voorschip. Ze zijn voor- en achterzijde van één compartiment. Deze keuze is min of meer willekeurig geweest, maar hij was goed omdat in dat gebied van het schip voldoende ruimte was om de schotten over grote afstanden te verschuiven (het ene, 'transO1', tussen 45 en 55m; het andere, 'transO2', tussen 60 en 68m).

Een vuistregel voor het gebruik van COMPACT is dat het aantal benodigde experimenten vijf- à tienmaal het aantal variabelen is; in de studie werden vijftien simulaties gegenereerd. Het uiteindelijk verkregen Kriging-model (figuur 2) toont dat er significante variaties in de waarde van de veiligheidsindex optreden. Nu is het interessant - en om de bruikbaarheid van COMPIAS te testen: noodzakelijk - om na te gaan in hoeverre het model overeenkomt met de werkelijke verandering van de veiligheidsindex als functie van beide



Figuur 1. De user interface van COMPIAS. De afbeelding toont het onderdeel waarin de gebruiker de ontwerpvariabelen selecteert.

schotposities. Hiertoe werd een model van 225 (= 152) experimenten geconstrueerd. (Een toename van het aantal simulaties zou immers een nauwkeuriger beeld van het verloop van A moeten opleveren.) De resultaten zijn in figuur 3 weergegeven.

De indruk die uit een eerste vergelijking van beide afbeeldingen wordt verkregen, is dat het eenvoudige model redelijk goed is, behalve waar sterke variaties optreden (de geprotonceerde pieken en dalen in figuur 2 bijvoorbeeld, en de sterke niveaoverschillen in figuur 3). Een nadere bestudering in COMPACT leert dat de modelfout, die de reproduceerbaarheid van het model uitdrukt bij weglating van een willekeurig experiment, respectievelijk 18,54% en 0,58% bedraagt. Beide modellen plaatsen het optimum op de ondergrens van trans01; alleen de posities van trans02 verschillen enigszins. De voorspellingen van de maximale waarde van A zijn echter weer gelijk.

Evaluatie

Een eerste, misschien triviale conclusie die uit de test kan worden getrokken is dat het ontwerpprobleem zoals dat hier is uiteengezet inderdaad een optimum heeft, dat wil zeggen: er is een maximale veiligheidsindex te vinden. Bovendien levert het optimum voldoende ver-

betering van de veiligheid ten opzichte van de overige scheepsindelingen, zodat het loont om ernaar te streven. Een wellicht even belangrijke gevolgtrekking is dat, hoewel er zoals gezegd een redelijk vloeiend verloop naar een hoogste waarde waargenomen kan worden in figuren 2 en 3, de onregelmatigheden erin het waarschijnlijk verhinderen om met trial and error een even goed resultaat te boeken als met COMPACT.

Het is gebleken dat COMPACT op basis van ruim 200 experimenten een grote nauwkeurigheid bereikt. In de praktijk moet er echter rekening worden gehouden met een groter aantal ontwerpvariabelen (N), dat het onmogelijk maakt om de omvang van het simulatieschema in dezelfde verhouding tot N te laten staan als in het beschreven voorbeeld. Meestal is dit overigens toch niet nodig om een acceptabel resultaat te verkrijgen, zoals uit figuur 2 blijkt.

Er vindt verder onderzoek plaats naar een sequentiële aanpak van het probleem, waarbij een klein schema wordt gebruikt voor de optimalisatie waarna de procedure in een klein gebied rond de lokale optima wordt herhaald, om het aantal benodigde experimenten verder te reduceren.

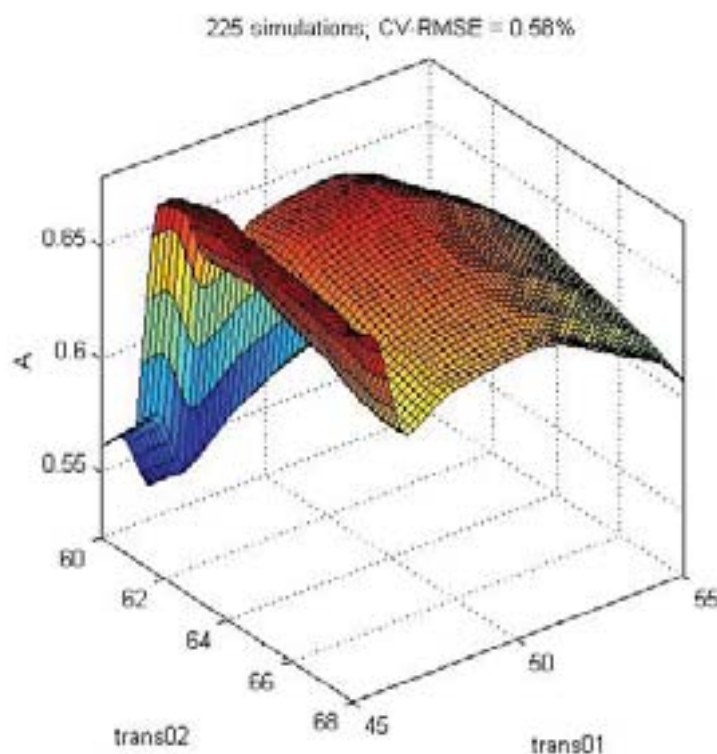
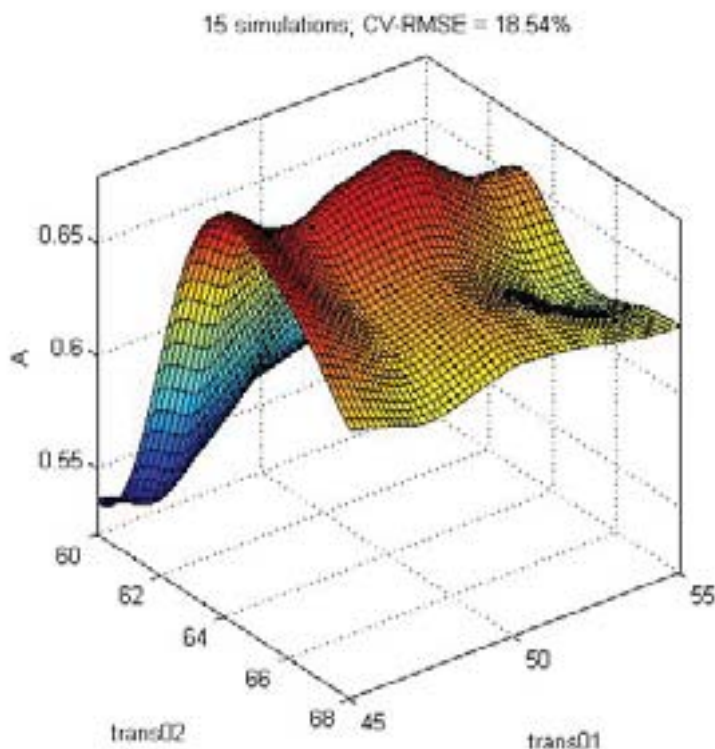
In dat verband is vermeldenswaardig dat de computerrekening niet als belemmerende factor moet worden gezien. De COMPIAS-aanpak

vergt inderdaad veel rekenwerk, maar huidige computers kunnen dat relatief snel uitvoeren. De voordelen die uit de kennis van de optimale scheepsindeling kunnen worden gehaald, zouden het de moeite waard moeten maken om dit proces te doorlopen. De eerste test van COMPIAS spoort in ieder geval aan tot verder onderzoek. Er wordt nu gewerkt aan een uitbreiding van het aantal ontwerpvariabelen naar twaalf, inclusief de drie hoofdafmetingen.

Deelnemers aan het project

- Sectie Ontwerpen van Schepen, Maritieme Techniek, Technische Universiteit Delft
- Scheepsbouwkundig Advies- en RekenCentrum SARC BV, Bussum
- Centre for Quantitative Methods CQM, Eindhoven
- Structural Optimization and Computational Mechanics Group, Technische Universiteit Delft
- Coöperatieve Vereniging Cad/Cam in de Scheepsbouw (in dit project vertegenwoordigd door Schelde Naval Shipbuilding)

Sipke Vijver is student Maritieme Techniek, Technische Universiteit Delft
s.vijver@student.tudelft.nl



Figuur 2 Het model dat COMPACT heeft opgesteld voor de veiligheidsindex A (verticaal uitgezet) als functie van twee schotposities. Het aantal simulaties bedroeg vijftien.

Figuur 3 Het verloop van de veiligheidsindex A als functie van dezelfde schotposities; het model is gebaseerd op 225 simulaties.